

Г. Г. ЖЕМЕРОВ, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;

Д. С. КРЫЛОВ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»;

Д. В. ТУГАЙ, канд. техн. наук, доцент ХНАГХ.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ И КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Введение. Одним из способов уменьшения потерь энергии в системах электроснабжения (СЭ) является подключение параллельно нелинейной нагрузке силового активного фильтра (САФ), обеспечивающего близкую к синусоиде форму суммарного тока линии, соединяющей источник и нагрузку, и заданный угол сдвига между фазным напряжением сети и основной гармоникой фазного сетевого тока. Силовые схемы параллельных САФ идентичны силовым схемам автономных инверторов напряжения (АИН), однако параметры схемы и режимы работы существенно различны [1]. Системы управления САФ выполняются, как правило, на основе теории мгновенной активной и реактивной мощностей с релейным или векторным регулятором [2]. В настоящей статье приведен пример отладки *Matlab*-модели СЭ с САФ путем изменения параметров. Показана возможность получения почти синусоидального тока линии, с коэффициентом несинусоидальности (THD) менее 5% при выполнении других требований, сформулированных в техническом задании.

Постановка задачи. Современный уровень развития средств объектного моделирования позволяет перед началом производства и лабораторных испытаний нового изделия верифицировать его работу по предложенной функциональной или принципиальной схеме и рассчитанным параметрам элементов. При этом, как показала практика, полученные в модели результаты с высокой степенью точности совпадают с результатами, полученными на физическом образце. Степень приближения виртуальных и реальных результатов работы объекта напрямую зависит от точности выданного технического задания и от желаемой степени детализации модели. Естественно, чем более детальную модель желает получить разработчик, тем сложнее она получается, тем больших вычислительных затрат требует её реализация. Современный пакет моделирования *Matlab/Simulink/SimPowerSys* позволяет получить максимально приближенные к реальности результаты моделирования схем силовой электроники при приемлемом уровне вычислительных затрат. Потому именно он был выбран разработчиком, пожелавшим перед началом реализации рассчитанного объекта проверить корректность его работы и соответствие выходных параметров его работы имеющимся техническим условиям.

Материалы исследования. В качестве объекта моделирования разработчиком предложен параллельный САФ, задачей которого является подавление искажений на входе СЭ, содержащей АИН с ШИМ и ещё две аналогичные некомпенсированные нагрузки, подключенные к шинам той же питающей подстанции,

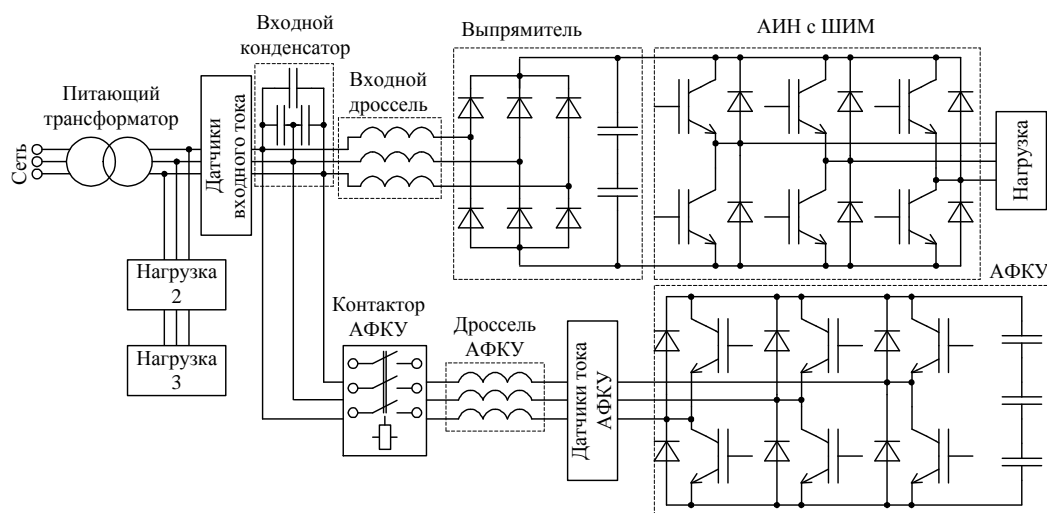


Рис.1 Структурная схема объекта моделирования

Структурная схема исследуемого объекта приведена на рис.1.

Согласно техническому заданию данная схема содержит:

– Трехфазную питающую сеть с линейным напряжением 6кВ, частотой 50+/-2 Гц. Искажение напряжения сети при выключенной нагрузке не превышает 5%;

– Питающий трансформатор подстанции 6кВ/0.4кВ имеет мощность 1МВт и напряжение короткого замыкания $e_K = 5.9\%$ с соединением первичных и вторичных обмоток в звезду без вывода нулевого провода. Предполагается возможность отклонения выходного напряжения питающего трансформатора в зависимости от внешних факторов в пределах 380В +25/-25%;

– Входные конденсаторы САФ имеющие расчетную ёмкость 23 мкФ каждый, соединены в треугольник; входная индуктивность фазы САФ – 150 мкГн; суммарная ёмкость звена постоянного тока САФ – 18 мФ; максимальный действующий выходной ток САФ – 190А;

– САФ работает с фиксированной частотой модуляции, которая определяется допустимым тепловыделением на силовых ключах. При использовании силовых модулей 12-го класса частота ШИМ не должна превышать 7 кГц, при использовании модулей 17 класса – 4 кГц;

– Расчетная ёмкость звена постоянного тока АИН равна 28 мФ; входная индуктивность фазы АИН – 75 мкГн; номинальный ток звена постоянного тока АИН – 615 А, что соответствует номинальной мощности нагрузки в 300 кВт.

Поставленной задачей является создание в программной среде *Matlab/Simulink/SimPowerSys* математической модели преобразовательной системы, представленной на рис.1 с приведенными выше параметрами. При этом разработать алгоритм управления САФ, обеспечивающий следующие характеристики:

- THD (коэффициент несинусоидальности) входного тока системы не должен превышать 5%;
- Исследовать возможность снижения: класса силовых модулей САФ; частоты ШИМ САФ;

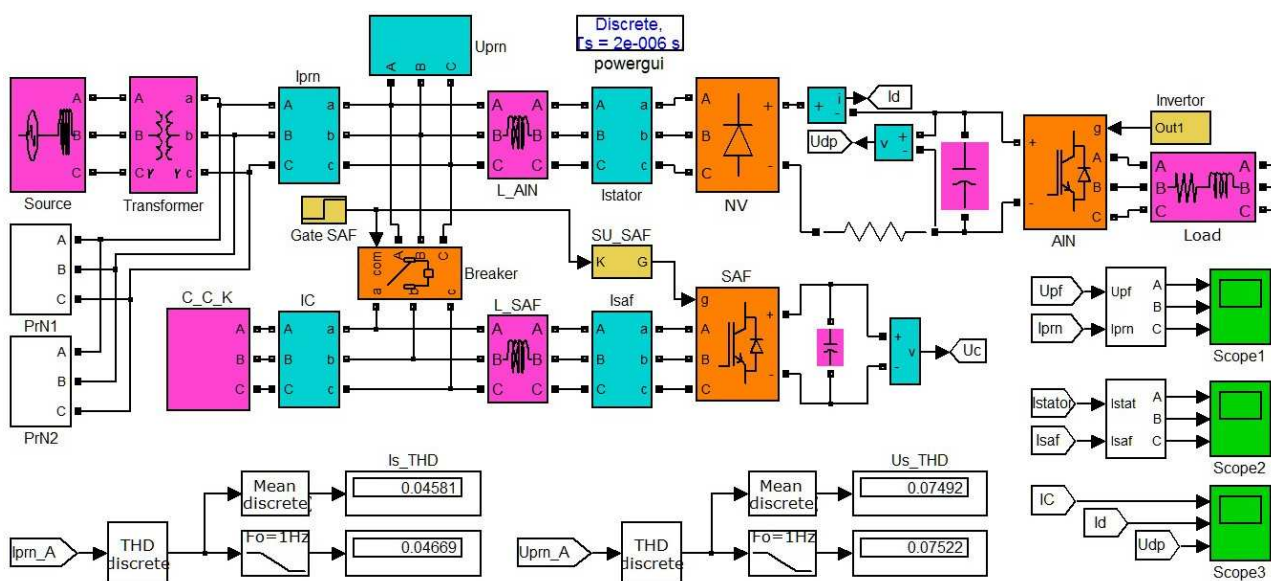


Рис.2 Matlab-модель СЭ с САФ

индуктивности входных дросселей и ёмкости конденсатора звена постоянного тока САФ при строгом соблюдении предыдущего условия ($THD < 5\%$).

На рис.2 представлена математическая модель системы электроснабжения с параллельным САФ.

Данная модель полностью удовлетворяет параметрам качества потребляемой электроэнергии, заданной в техническом задании. Однако для этого в топологию схемы СЭ рис.1 пришлось внести некоторые незначительные коррективы.

Так, входной конденсатор САФ пришлось убрать из цепи питающей сети и подключать его с помощью контактора АФКУ вместе с силовым активным фильтром. Это было сделано во избежание возникновения резонансных явлений с индуктивностью питающего трансформатора и прочих нагрузок при отключенном САФ.

Параметры некоторых элементов схемы также были скорректированы для достижения результатов, удовлетворяющих техническому заданию. Рассмотрим основные элементы модели:

– Питающая сеть моделируется трехфазным симметричным источником переменного напряжения Source 6 кВ и индуктивностью фазы 20 мкГн, что, в сочетании с параметрами питающего трансформатора Transformer, соответствует реальным условиям источника питания, указанным в техническом задании.

– Ёмкости входных конденсаторов САФ C_{C_K} пришлось увеличить в два раза относительно расчетной и она составила 46 мкФ каждая при соединении в треугольник. Входная индуктивность фазы САФ L_{SAF} наоборот была уменьшена в два раза относительно расчетной и составила 75 мкГн. Суммарная ёмкость звена постоянного тока САФ осталась на уровне расчетной – 18 мФ. Максимальный действующий выходной ток САФ не превышает заданный в техническом задании при любых режимах работы схемы.

– САФ работает с фиксированной частотой модуляции 6 кГц при поддержании постоянного напряжения на конденсаторе на уровне 770 В, что на практике даёт возможность использовать силовые модули 12-го класса с существенным запасом по напряжению.

– Ёмкость звена постоянного тока АИН осталась на уровне расчетной – 28 мФ, а входная индуктивность фазы АИН L_{AIN} увеличена вдвое – 150 мкГн. Активное сопротивление и индуктивность фазы эквивалентной нагрузки $Load$ равны 0.25 Ом и 1 мкГн, что обеспечивает номинальный ток звена постоянного тока АИН в 615 А и соответствует номинальной мощности нагрузки в 300 кВт по техническому заданию.

– Прочие нагрузки $PrN1$ и $PrN2$, подключенные к выходу питающего трансформатора параллельно с основной, схемно по своим параметрам полностью повторяют основную нагрузку в виде АИН с ШИМ.

– САФ подключается параллельно питающей сети с помощью трехфазной контактной группы *Breaker* в момент времени, задаваемый блоком *Gate SAF*.

– Силовая схема *Matlab*-модели включает в себя блоки датчиков, часть из которых, – входного тока I_{prn} , входного фазного напряжения U_{prn} , тока САФ I_{saf} и напряжения звена постоянного тока САФ U_c , – используются для работы системы управления силовым активным фильтром *SU_SAF*. Остальные датчики служат для вывода наглядной информации о работе схемы на осциллографы *Scope1–3*.

Система управления САФ *SU_SAF* выполнена с использованием $p-q-r$ теории мощности. Её топология и используемые при работе математические преобразования подробно описаны в [3]. Данная система управления имеет ряд существенных преимуществ, позволяющих успешно применять её при моделировании и создании различных типов силовых активных фильтров. Так как все сигналы, циркулирующие в системе управления, представлены в относительных единицах, подбор соответствующих масштабных коэффициентов можно легко добиться её корректной работы в широком спектре параметров СЭ с САФ. В качестве базовых величин при расчете принимаются номинальный действующий ток и напряжение фазы питающей сети в точке подключения САФ.

Ещё одним важным преимуществом данного типа системы управления является использование всего одного, чаще всего пропорционально-интегрального, регулятора – регулятора напряжения на конденсаторе САФ, настройка параметров которого, в отличие от других возможных систем управления, обычно особых проблем не вызывает.

Существенным же отличием СУ САФ, применённой в модели рис.2, от СУ САФ, описанной в [3], является использование алгоритма формирования управляющих импульсов на силовые ключи с фиксированной, заранее заданной частотой модуляции. Это, в отличие от релейного алгоритма без фиксированной частоты модуляции [3], позволяет точно оценить возможности применения того или иного типа силовых модулей исходя из их частотных характеристик и допустимого тепловыделения. Однако это же ухудшает эффективность работы САФ, особенно при наличии крутых фронтов в компенсируемом токе сети при малой индуктивности фазы. Поэтому входная индуктивность фазы АИН в модели была увеличена вдвое относительно расчетной.

Ниже приведены машинограммы, характеризующие качество работы силового активного фильтра в моделируемой системе электропитания. На рис.3 показаны машинограммы входных токов САФ и АИН, снятые с датчиков фазных токов I_{stator} и I_{saf} . Из рис.3 видно, что входной ток АИН имеет форму, характерную для шестипульсного мостового неуправляемого выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку.

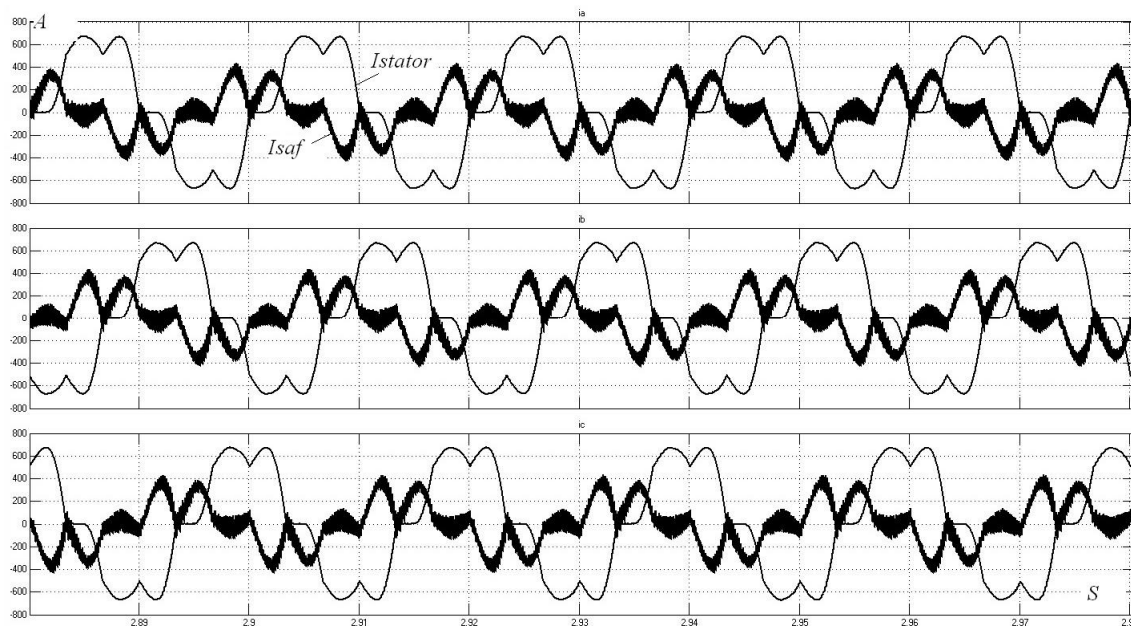


Рис.3 Машинограммы входных токов САФ и АИН

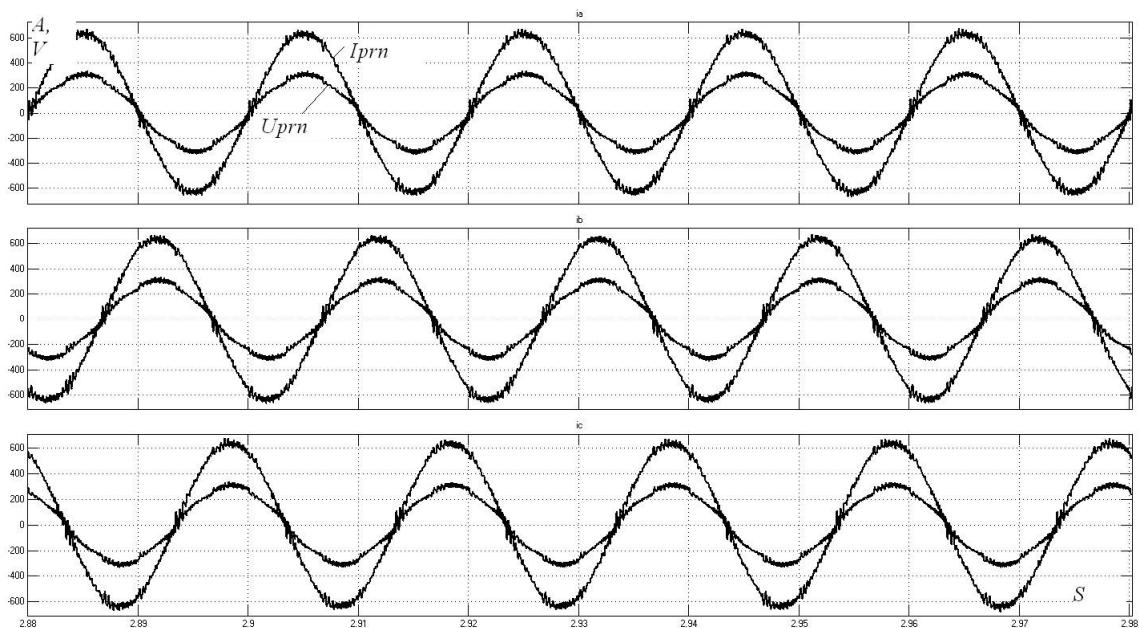


Рис.4 Машинограммы входных фазных токов и напряжений СЭ с САФ

На рис.4 приведены машинограммы скомпенсированного фазного тока и напряжения на входе СЭ с САФ, снятые с датчиков I_{prn} и U_{prn} . Из рис.4 видно, что фазные ток и напряжение в точке подключения САФ имеют практически синусоидальную форму, и находятся в фазе друг с другом. Также видно, что наибольшие помехи фазный ток имеет в интервалах резкого изменения входного тока АИН, что, как уже было отмечено ранее, является естественной платой за использование алгоритма работы САФ с фиксированной частотой модуляции при стремлении к максимальному её уменьшению ради удешевления используемых силовых модулей и их системы охлаждения.

Тем не менее, согласно результатам моделирования, такая форма сетевого тока (рис.4) имеет коэффициент несинусоидальности THD , стабильно лежащий в пределах 4.5–4.7 %, что полностью соответствует условиям технического задания. Более того, при повышении частоты модуляции до допустимых по заданию 7кГц есть возможность снизить THD сетевого тока до 4–4.2%.

THD фазного напряжения находится на уровне 7.5% и существенному снижению его в предложенной по Т.3. топологии мешает синхронная работа от общего источника ещё двух, аналогичных компенсируемому, некомпенсированных автономных инверторов напряжения такой же мощности.

Выводы. Моделирование системы электроснабжения с параллельным силовым активным фильтром по структуре, приведенной на рис.1 показало принципиальную возможность достижения в реальном устройстве той же мощности, подключенных к шинам питающей подстанции параллельно с основной нагрузкой, делают практически невозможной полную компенсацию искажений в кривой питающего напряжения средствами одиночного САФ. Индуктивности прочих нагрузок и питающей сети также оказывают существенное влияние на качество работы параллельного САФ, входную ёмкость и индуктивность которого приходится подстраивать под конкретные параметры сети и прочих нагрузок. В целом же предложенная система имеет существенный запас для улучшения технико-экономических показателей. Дальнейшая детализация рассмотренной модели (рис.2) может осуществляться учётом алгоритма формирования управляющих импульсов на силовые ключи САФ конкретным микроконтроллером СУ, используемым разработчиком, а также моделированием асинхронной нагрузки с введением в модель параметров используемой асинхронной машины и алгоритмов её управления, что позволит в большей степени приблизить работу модели к физическому образцу.

Список литературы: 1. Жемеров Г.Г. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности / Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, Д.В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – Част.4. С. 22–27. 2. Домнин И.Ф. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазных системах электроснабжения / И.Ф. Домнин, Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, Д.В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. С 52-59. 3. Жемеров Г.Г. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения / Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, О.В. Ильина, Д.В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. – 2008. – Част.2. С. 80–87.

Bibliography (transliterated): 1. Zhemerov G.G., O.V. Ilina and D.V. Tugay «Energoberegaushij effect kompensacii pulsacij mgnovennoj aktivnoj moshnosti.» *TED, tem.vyp.:SEE.* – Ch.4. 2006. 22–27 Print. 2. Domnin I.F., G.G.Zhemerov, O.V. Ilina and D.V. Tugay «Energoeffektivnost korrekcii fazy toka i kompensacii pulsacij aktivnoj i reaktivnoj moshnostej v trehfaznih sistemah elektrosnabzhenija.» *TED.* – 2007. №1. 52–59 Print. 3. Zhemerov G.G., N.A. Ilina, O.V. Ilina and D.V. Tugay «Umenshenie poter i ulichshenie kachestva elektroenergii v sistemah kommunalnogo elektrosnabzhenija.» *TED, tem.vyp.:SEE.* – Ch.2. 2006. 80–87 Print.

Поступила (received) 24.08.2015